

dr hab. inż. Tadeusz Szymczak, prof. ITS
 Instytut Transportu Samochodowego
 Zakład Homologacji i Badań Pojazdów
 ul. Jagiellońska 80
 03-301 Warszawa
 tel. 22 43 85 307, e-mail: tadeusz.szymczak@its.waw.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Katarzyny Hyc-Dadak
 pt. "Ocena właściwości mechanicznych i strukturalnych złączy spawanych pojazdów
 w warunkach dynamicznych obciążeń granicznych"**

Podstawa wykonania recenzji:

powołanie na recenzenta
 przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
 Politechniki Śląskiej, z dnia 12.07.2023 r.

Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska skoncentrowana jest na ocenie właściwości mechanicznych i cech makro- oraz mikrostrukturalnych złączy spawanych wykonanych ze stali konstrukcyjnej, przy oddziaływaniu obciążenia dynamicznego. Opracowano ją w liczbie 110 stron wyróżniając 6 rozdziałów, jak: wprowadzenie, analiza literaturowa, założenia teza i cel pracy, badania własne, wyniki badań oraz podsumowanie i wnioski. Zamieszczono w nich opis merytoryczny, zdjęcia, tabele i wykresy oraz wzory. Należy stwierdzić, że ogólne cechy rozprawy doktorskiej nie budzą zastrzeżeń, lecz wskazują na jej uporządkowaną i logiczną formę.

Ocena merytoryczna rozprawy

W pierwszych podrozdziałach rozprawy doktorskiej poprawnie omówiono techniki badań nieniszczących i niszczących - przywołując określone normy i wskazując znaczenie poszczególnych rodzajów prób w ocenie jakości złącza spawanego. Zaprezentowano badania materiałów i konstrukcji w warunkach obciążenia dynamicznego, rozpoczynając od wahadłowego młota udarnościowego, wprowadzając następnie cechy techniczne młota spadowego i kolejno stanowisk badawczych - dedykowanych próbom dynamicznym, jak stanowisko dzielonego pręta Hopkinsona. Na uwagę zasługuje sformułowanie dotyczące: (a) możliwości wykorzystywania młotów rotacyjnych jako starszych stanowisk badawczych, niewymagających wysokich kosztów zarówno na etapie przygotowywania badań, jak również ich realizacji oraz (b) konieczności posiadania odpowiedniej wiedzy i doświadczenia w interpretacji wyników badań, czyli ogólnie ujmując, znajomości fizyki zagadnienia. Poprawnie zwrócono uwagę na różnice w oczekiwaniach zespołów badawczych zajmujących się obliczeniami a możliwościami grup badawczych - prowadzących doświadczenia - wynikającymi z parametrów i cech technicznych wykorzystywanych przez nich stanowisk badawczych - mających szczególne znaczenie, gdy oba rodzaje wymienionych jednostek zawodowych wspólnie realizują przedsięwzięcie. Uwagę zwraca również przywołany wykres nowoczesnych stali konstrukcyjnych dla przemysłu motoryzacyjnego, który został opracowany przez zespoły związane z branżą wytwórczą materiałów konstrukcyjnych oraz producentów stali zaledwie kilka lat temu, co wskazuje na sięganie przez Autorkę rozprawy doktorskiej do informacji o nowoczesnych materiałach i związanych z nimi etapami rozwoju.

W tym samym rozdziale omówiono wybrane literaturowe wyniki badań przedstawiając je w postaci wykresów zawierających zmiany parametrów mechanicznych i zależności naprężenie-odkształcenie oraz zaprezentowano makroskopowe i mikroskopowe zdjęcia przelomów (z uwzględnieniem charakteru pękania: kruche, plastyczne, mieszane) - uzyskanych w próbie rozciągania i teście ściskania oraz rozciągania z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona z uwzględnieniem wysokich wartości prędkości obciążenia. W tej części pracy zawarto również mechanizmy zmian mikrostrukturalnych związanych z plastycznym odkształcaniem metali. Zamieszczono także wyniki pomiarów mikrotwardości złącza spawanego,

wplynieto dnia 25.07.2023
 RD/ITS/162/5112023 legrempf.
 nr zat.

T. Szymczak

które pomimo, że sposób ich wyznaczania jest znany od początków XIX wieku, to wciąż mają bardzo dużą rolę w ocenie jakości technicznej połączenia zarówno w znaczeniu eksperckim, jak również wytwórczym, ponieważ w wielu poradnikach spawania stali wysokowytrzymałych są podawane jako warunek konieczny dla uzyskania złącza w akceptowalnej jakości. Analizę wyników badań literaturowych zakończono omówieniem rezultatów prób dynamicznych z użyciem dzielonego pręta Hopkinsona i statycznych - dotyczących nowoczesnych stali konstrukcyjnych.

Teza rozprawy doktorskiej oraz następujący po niej akapit, przybliżający sposób jej udowodnienia, zostały sformułowane poprawnie. Schematyczne przedstawienie programu badań daje podstawę do stwierdzenia o właściwym postępowaniu Doktorantki z planem doświadczenia. Stanowiska badawcze omówiono w szczególności, wskazując że dużą zaletą urządzeń badawczych poprzedniej generacji jest ich uniwersalność i działanie - bazujące na zagadnieniach fizyki i mechaniki, natomiast rejestracja wyników badań możliwa jest po uprzedniej modernizacji. Stosunkowo dokładnie omówiono opracowywanie wyników badań, biorąc pod uwagę specyfikę stanowiska badawczego, wpływającą bezpośrednio na przesunięcie czasowe rejestrowanych rezultatów testów. Zwrócono uwagę na trudności w pomiarach wydłużenia próbki w teście prowadzonym przy użyciu młota rotacyjnego, nawet jeżeli urządzeniem rejestrującym będzie kamera CCD do rejestracji szybkozmiennych zjawisk.

Materiałem badawczym była stal S355J2+N, która stosowana jest w przemyśle motoryzacyjnym szczególnie w strefach bezpieczeństwa biernego środków transportu (naczepy, przyczepy) zabezpieczających (TUZ - Tylne Urządzenie Zabezpieczające) przed wjechaniem samochodu pod ich podwozie. Znajduje ona również wykorzystanie w wytwarzaniu ram roboczych holowników drogowych i ram pojazdów ciężarowych. Zaprezentowany przez Doktorantkę sposób rozmieszczenia próbek wytrzymałościowych w obszarze blachy zawierającej połączenie spawane zasługuje na uwagę, ponieważ wykracza poza stosowane standardy i wpisuje się w bieżące doświadczalne kierunki postępowania ze złączem spawanym. Jakość wytworzonego w ramach realizacji rozprawy doktorskiej złącza spawanego można było zauważyć w wartościach twardości, które przewyższały wartości wymienionego parametru mechanicznego materiału rodzimego.

Pomiary twardości wykorzystano w określeniu wpływu prędkości bijaka w teście udarności na zachowanie materiału rodzimego i połączenia spawanego. Analizę fraktograficzną prowadzono zarówno w makro- jak i mikroobszarach przelomów po próbie udarności realizowanych z różną prędkością bijaka, wskazując cechy charakterystyczne stref zniszczenia, określające procentowy udział pęknięcia kruchej lub plastycznej. W efekcie wskazano, że ze wzrostem prędkości bijaka zwiększeniu ulegał procentowy udział kruchej pęknięcia w rozdzielaniu badanego materiału przy zachowaniu dominującego wpływu pęknięcia o charakterze plastycznym w zakresie wykorzystanych wartości prędkości obciążenia.

Wyniki badań próby rozciągania poprzedzono analizą wpływu nieosiowego ustawienia bijaka lub próbki wytrzymałościowej. W ten sposób Autorka rozprawy doktorskiej wskazała na duże znaczenie niewłaściwego mocowania obiektu badań lub układu obciążającego, prowadzącego w efekcie do niemiernodajnych rezultatów badań. Dodatkowo, w rozprawie zawarto wyniki badań w postaci zależności zmian wartości składowych siły w funkcji wartości kąta związanego z brakiem współosiowości kierunku wektora obciążenia i głównej osi próbki wytrzymałościowej. Zasadnicze wyniki badań ujawniły różnice w charakterystykach naprężenie-odkształcenie materiału rodzimego, złącza spawanego i stopiwa, wskazując tym samym na różnice w wartościach parametrów mechanicznych badanych obszarów materiałowych. Należy jednak zaznaczyć, że ten rodzaj wyników badań określił wyższe parametry mechaniczne spoiny i stopiwa, poza wydłużeniem względnym, w porównaniu do ich odpowiedników związanych z materiałem rodzimym.

W przypadku każdej strefy materiałowej wpływ prędkości rozciągania dynamicznego charakteryzował się zwiększeniem wartości wytrzymałości na rozciąganie - w porównaniu do rezultatu uzyskanego w statycznej próbie rozciągania - świadcząc o efekcie umocnienia wskutek zastosowanego rodzaju obciążenia. W zakresie wyników badań pochodzących z prób dynamicznych - jedynie w przypadku materiału rodzimego - obserwowano wzrost wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zwiększeniu wartości prędkości rozciągania. Rozpatrywanie rezultatów próby rozciągania - prowadzonej w warunkach dynamicznych - poprzez pracę odkształcenia i jej proporcję do początkowej powierzchni przekroju poprzecznego próbki wskazało na osłabianie materiału rodzimego wskutek wzrostu prędkości próby wytrzymałościowej.

Mikroskopowe obserwacje przy użyciu SEM przelomów próbek poddanych rozciąganiu statycznemu i dynamicznemu wykorzystano w analizie charakterystycznych cech związanych z degradacją materiałów w rozpatrywanych warunkach obciążenia. W efekcie uzyskano różnice cech strefy zniszczenia z próby statycznej i dynamicznej, przejawiające się mniejszym rozmiarem wgłębień gdy materiał poddany był wysokim prędkościom rozciągania. Istotne różnice w charakterze rozdzielania badanych stref materiałowych ujawniono w badaniu makroskopowym. Przełom stopiwa po próbie statycznego rozciągania wskazywał na pękanie mieszane (krucho-plastyczne) z widoczną strefą rozdzielczego rozłączenia w środku próbki i poślizgowego w pozostałym obszarze. W przypadku wysokiej wartości prędkości rozciągania rozdzielanie materiału występowało przy jednakowym udziale naprężenia normalnego i stycznego w strefie zniszczenia, prowadząc do powstania przelomu poślizgowego.

Uwagi szczegółowe do ocenianego opracowania naukowego

Autorka rozprawy doktorskiej wskazała na próbę statycznego zginania jako istotną w ocenie jakości technicznej złącza spawanego, formułując następująco: *zginanie poprzeczne, zginanie wzdlużne* oraz podając rodzaje składowych naprężenia, które towarzyszą wymienionym rodzajom badań. Jednak w odniesieniu do realizowanych prób zginania należy wymienić test trójpunktowego lub czteropunktowego zginania. Dlatego w ocenie recenzenta tę kwestię można byłoby uzupełnić rysunkiem i tekstem.

Nienajlepszym stwierdzeniem jest „*Bezwałdnosc materiału ...*”, którą trudno odnaleźć w dostępnej literaturze. W innym miejscu recenzowanej pracy naukowej Doktorantka - bazując na literaturze - przywołuje *model sprężysto-plastyczny* materiału, który w tym zapisie nie wskazuje na cechy charakterystyki naprężenie-odkształcenie, a przecież na tej podstawie określane są nazwy modeli materiałów.

Sformułowanie *naprężenie zredukowane* oznacza obniżenie wartości. W związku z tym lepiej jest używać nazwy *naprężenie efektywne, równoważne lub ekwiwalentne*.

Zapisy stali w gatunku *AHSS, TRIP, DP* nie zawierają odpowiednio rozwinięcia nazw i parametrów mechanicznych. Podobna uwaga dotyczy oznaczenia stali *NBA* i *MAR*.

Nazwy osi rzędnych, zawierające wartości twardości badanej strefy, zaprezentowano zapisem ogólnym powszechnie stosowanym i zgodnym z normami, przy czym ze względów naukowych warto stosować jednostki, ponieważ rozpatrywany parametr mechaniczny skorelowany jest z wytrzymałością na rozciąganie.

Miejscami Autorka rozprawy doktorskiej używa wyrazu *Automotive*, co może prowadzić do wniosku, że znajduje się on w zasobach języka polskiego. Należałoby jednak przyjąć innego rodzaju wyrażenie, jak: *przemysł motoryzacyjny* lub *przemysł samochodowy*.

W rozprawie doktorskiej wprowadzono również sformułowanie .. *cyklicznie zmienne oraz zmęczeniowe* wskazując że wymienione obciążenia nie oznaczają tego samego rodzaju wymuszenia.

Autorka rozprawy posługuje się również terminologią „... *wplywu dużych i bardzo dużych prędkości odkształcenia ...*” a przecież odpowiedniejszymi sformułowaniami będą: *wysokich i bardzo wysokich*, zwłaszcza, że prędkość odkształcenia jest reprezentowana wektorem.

Parametry mechaniczne stali *S355J2+N* przedstawiono wartościami wyraźnej granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia względnego. Zabrakło natomiast informacji o wartości granicy proporcjonalności i granicy plastyczności.

Rozmieszczenie próbek walcowych nie uwzględniało próbki prostopadłej do kierunku walcowania blachy, stwarzając wrażenie braku różnic w wartościach właściwości mechanicznych wytypowanego do badania materiału konstrukcyjnego.

Wyniki badań pochodzące z prób udarności, przeprowadzone z wykorzystaniem próbek wykonanych z materiału rodzimego i złącza spawanego, można również analizować przy uwzględnieniu czasu potrzebnego do uzyskania zerowej wartości siły.

W nazwie rysunków określających wyniki badań z prób rozciągania w warunkach oddziaływania obciążenia dynamicznego posłużono się nazwą *przebieg*, który z definicji jest zmianą wartości wielkości fizycznej w czasie.

Wprowadzono nazwę „efektu Plateau” do krzywych rozciągania materiału rodzimego, spoiny i stopiwa, które można określić mianem materiału idealnie liniowo-sprężystego ze wzmocnieniem nieliniowym i niestatecznością.

Nazwa maksymalne naprężenie rozpatrywane w badaniu rozciągania ma pewne uzasadnienie, niemniej jednak korzystniej byłoby stosować nazwę maksymalna wartość naprężenia.

Przełom próbki wytrzymałościowej (wykonanej ze stopiwa) po teście rozciągania dotyczy materiału o cechach sprężysto-plastycznych w ogólnym sformułowaniu, wskazując tym samym na kolejność występowania stref degradacji w rozpatrywanych warunkach obciążenia i jednocześnie na zmiany składowych naprężenia biorących udział w rozdzieleniu materiału.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

W rozprawie doktorskiej podjęto istotny pod względem inżynierskim i naukowym problem dotyczący wpływu obciążeń dynamicznych na zmianę właściwości mechanicznych i cech strukturalnych stali konstrukcyjnej S355J2+N.

W przypadku pierwszego z wymienionych obszarów zawodowej działalności, wytypowany do badań materiał oraz metodyka badawcza wpisują się w projektowanie i produkcję ram pojazdów ciężarowych, ram roboczych i Tylnych Urządzeń Zabezpieczających w tym z wykorzystaniem modelowania 3D, metod obliczeniowych MES oraz kalkulacji analitycznych. Wynika to z faktu wykorzystywania badanej stali i jej złączy spawanych w wytwarzaniu wymienionych komponentów. Dodatkowo komponent TUZ jest elementem bezpieczeństwa biernego montowanym w tylnej części pojazdu, jak naczepa, przyczepa oraz inne ciężkie środki transportu, w celu uniemożliwienia wjazdu pod ich podwozie innego pojazdu.

Obszar naukowy rozprawy doktorskiej wyrażany jest metodyką badawczą wieloetapową i interdyscyplinarną oraz uzyskanymi wynikami badań, które można wykorzystywać w modelowaniu numerycznym przez inne zespoły badawcze. Uwagę zwraca schemat rozmieszczenia próbek wytrzymałościowych - niewystępujący w wielu pracach naukowych i nieuwzględniany w dokumentach normatywnych dotyczących złączy spawanych. Sposób rozwiązania problemu badawczego również zasługuje na podkreślenie, ponieważ skorzystano z urządzeń badawczych o wysokiej sztywności, doposażając je w wieloelementowy system rejestracji rezultatów testów. Uzyskane wyniki badań ze względu na ich interdyscyplinarność przejawiającą się danymi dla mechaniki materiałów i elementów konstrukcyjnych oraz inżynierii materiałowej również należy określić jako znaczące. Na podkreślenie zasługuje również zaproponowany sposób wyznaczania odporności materiału na dynamiczne obciążenie rozciągające.

Wniosek końcowy

Uwagi i komentarze zamieszczone w recenzji mają dyskusyjne znaczenie i w żaden sposób nie zmniejszają znaczenia rozprawy doktorskiej.

Rozprawa p. mgr inż. Katarzyny Hyc-Dadak spełnia wymagania określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym (z dnia 21 kwietnia 2017 roku) oraz zgodnie z zapisami art.179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669). W związku z powyższym może stanowić podstawę do nadania p. mgr inż. Katarzynie Hyc-Dadak stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie „inżynieria mechaniczna”. Wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

